

А. В. Поздняков*, Р. Ю. Барков, В. С. Золоторевский

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

**pozdniakov@isis.ru*

**МИКРОСТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА 1545К/В₄С
ДЛЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ
МЕХАНИЧЕСКОГО ЗАМЕШИВАНИЯ**

Получен композиционный материал 1545К + 5%В₄С методом механического замешивания частиц в расплав. Методом рентгенофазового анализа показано образование новых фаз Al₃BC и AlB₂ на границе матрица – частица, что говорит о хорошем межфазном взаимодействии. Композиционный материал 1545К + 5%В₄С имеет $\sigma_{0,2} = 425$ МПа, $\sigma_B = 455$ МПа и высокую стойкость к межкристаллитной коррозии при снижении механических характеристик менее чем на 5 %.

Ключевые слова: композиционный материал, карбид бора, механические свойства, межкристаллитная коррозия.

A. V. Pozdnyakov, R. U. Barkov, V. S. Zolotorevskiy

**MICROSTRUCTURE AND MATERIAL CHARACTERIZATION
OF 1545K/B₄C COMPOSITE PRODUCED BY STIR CASTING
TECHNIQUES FOR NUCLEAR APPLICATIONS**

The composite 1545K+5%B₄C were successfully produced by stir casting technique. A good interface reaction between the matrix and the B₄C reinforcements was observed by the formation of Al₃BC and AlB₂ (X-ray diffraction analysis was) phases on the matrix/B₄C interface. 1545K+5%B₄C alloy showed YS=425 MPa and UTS=455 MPa and, also high resistance to intercrystalline corrosion with decreasing in mechanical properties less than 5 %.

Keywords: composite material, boron carbide, mechanical properties, intercrystalline corrosion.

Коррозионно-стойкие стали с высоким содержанием бора обычно используются для изготовления стеллажей для уплотненного хранения отработанного ядерного топлива, в связи с высокой способностью бора поглощать тепловые нейтроны. Однако такие стали имеют низкую технологичность при обработке давлением даже при повышенных температурах [1]. Более эффективным материалом для изготовления стеллажей могут послужить композиционные материалы (КМ) на основе

более технологичных алюминиевых сплавов, армированных, в частности, карбидом бора (B_4C) [2–4]. К сталям с повышенным содержанием бора предъявляют следующие требования: $\sigma_{0,2} > 245$ МПа, $\sigma_b > 440$ МПа, относительное удлинение при горячей деформации более 10 % и стойкость к межкристаллитной коррозии. Этим требованиям могут удовлетворять алюминиевые сплавы системы Al–Mg, дополнительно легированным редкоземельными и переходными металлами, в частности сплав 1545K [5–7].

Объектом исследования служил сплав 1545K (Al–4,7Mg–0,32Mn–0,21Sc–0,09Zr) [6], армированный частицами B_4C средним размером 5 мкм.

Методика получения КМ подробно описана авторами в работах [8–10]. Микроструктуру и фазовый состав КМ исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа *TESCAN VEGA 3LMH* и рентгеновского дифрактометра *Bruker D8 Advance*. Термическую обработку слитков и листов проводили в печи *Nabertherm*. Прокатку слитка проводили на лабораторном стане с толщины 18 мм до 2 мм при температуре 250 °С с одним промежуточным отжигом при той же температуре в течение часа. Коррозионные испытания проводили в водном растворе 3%NaCl + 1%HCl в течение суток согласно ГОСТ [11]. Испытания на одноосное растяжение проводили на универсальной испытательной машине *Zwick/Roell Z250 Allround*.

В коррозионно-стойких сталях концентрация бора составляет обычно 2 % по массе. Для такой же атомной доли бора в алюминиевом сплаве его концентрация должна составлять примерно 4 % по массе, что соответствует 5 % B_4C .

На рис. 1 представлены микроструктуры КМ 1545K+5 % B_4C в литом и деформированном состояниях и рентгеновская дифрактограмма. После прокатки частицы B_4C (черные включения в микроструктуре) распределяются более однородно. Рис. 1, в иллюстрирует ровную границу между матрицей и частицей, без наличия пор и пустот. По результатам рентгенофазового анализа на дифрактограмме выявлены пики, соответствующие фазам Al_3BC и AlB_2 , которые могли образоваться только на границе матрица – частица. Это говорит о хорошем взаимодействии между матрицей и частицами B_4C .

По результатам испытания на растяжение КМ 1545K+5 % B_4C имеет $\sigma_{0,2} = 425$ МПа, $\sigma_b = 455$ МПа, что полностью удовлетворяет требованиям к прочностным характеристикам сталей. После проведения испытаний на межкристаллитную коррозию характеристики прочности снизились незначительно (менее чем на 5 %) и составили: $\sigma_{0,2} = 410$ МПа, $\sigma_b = 435$ МПа.

На рис. 2 представлены фактограммы излома образцов КМ 1545K–5 % B_4C после испытания на растяжение. Структура излома имеет ямочный характер с гребнями, что говорит о вязком разрушении. Частицы

карбида бора и поры, присутствующие в поверхности излома, скорее всего, послужили местами зарождения трещин при испытаниях на растяжение.

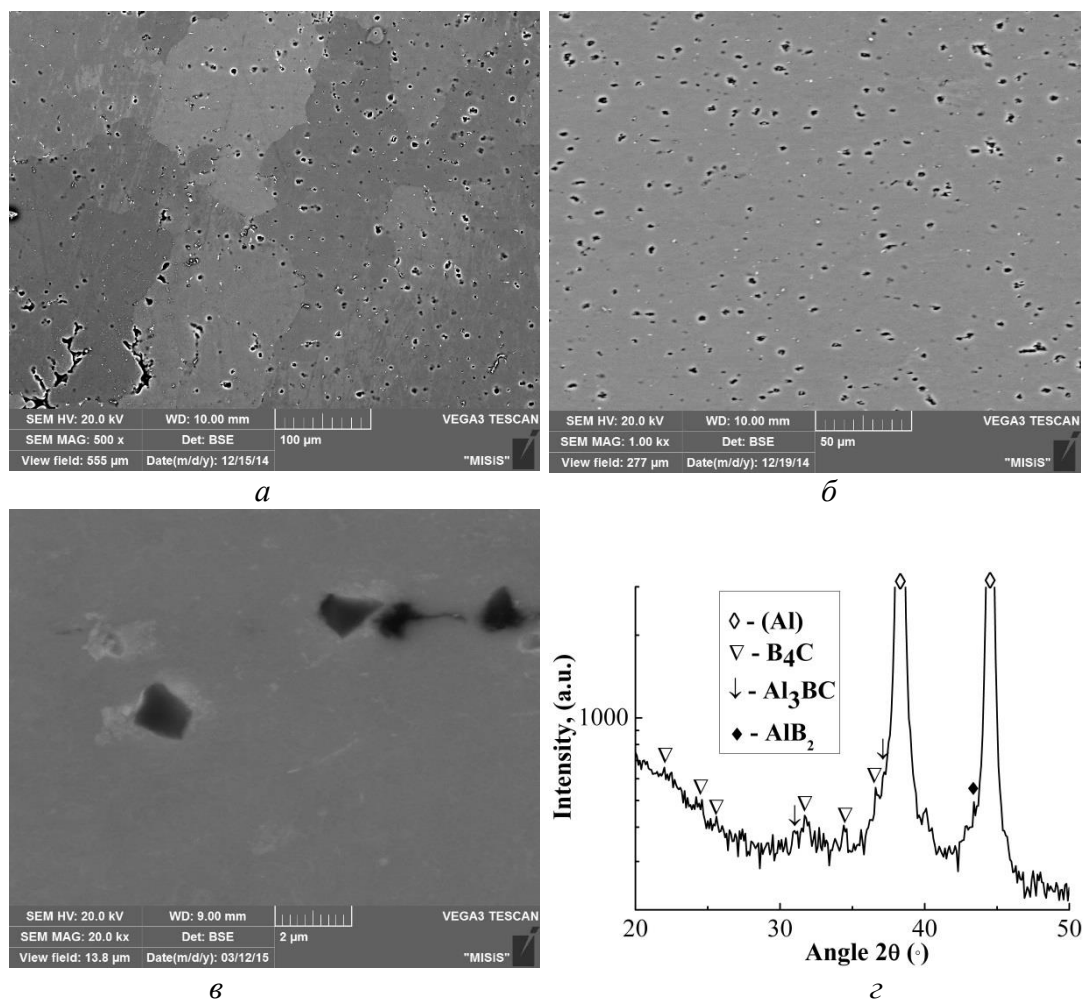


Рис. 1. Микроструктуры КМ 1545К+5%В₄С в литом (а) и деформированном (б, в) состояниях и рентгеновская дифрактограмма (г)

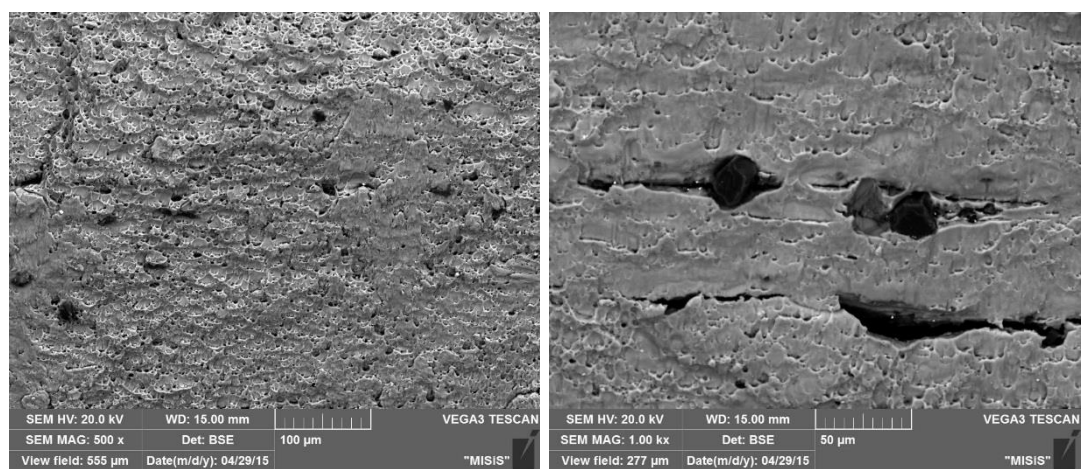


Рис. 2. Фрактограммы излома образцов КМ 1545К+5 % В₄С после испытания растяжение

ЛИТЕРАТУРА

1. Zaslavskii A. Ya., Mushtakova T. L. Ductile properties of boron steels for cold die forging // *Met. Sci. and Heat Treat.* 1992. Vol. 3. P. 17–21.
2. Canakci A., Arslan F., Varol T. Effect of volume fraction and size of B₄C particles on production and microstructure properties of B₄C reinforced aluminium alloy composites // *Int. J. of Cast Met. Res.* 2013. Vol. 29, № 8. P. 954–960.
3. Metallurgical parameters controlling matrix/B₄C particulate interaction in aluminium–boron carbide metal matrix composites / M. F. Ibrahim, H. R. Ammar, A. M. Samuel, M. S. Soliman, F. H. Samuel // *Int. J. of Cast Met. Res.* 2013. Vol. 26, № 6. P. 364–373.
4. Mechanical properties and fracture of Al–15 vol.-%B₄C based metal matrix composites / M. F. Ibrahim [et al.] // *Int. J. of Cast Met. Res.* 2014. Vol. 27, № 1. P. 7–14.
5. ASM Handbook Vol. 2. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. Materials Park : ASM International, 2010. 1328 p.
6. Новый термически упрочняемый, свариваемый, криогенный сплав 1545K на основе системы Al-Mg-Sc / Ю. А. Филатов [и др.] // *Технология легких сплавов.* 2014. № 1. С. 32–36.
7. Fatigue properties of Al-Mg alloys with and without scandium / O. Roder [et al.] // *Mater. Sci. Eng. A.* 1997. Vol. 234–236. P. 181.
8. Tensile and Fatigue Properties of Al-Mg-Sc-Zr Alloy Fine-Grained by Equal-Channel Angular Pressing / A. Washikita [et al.] // *Ultrafine grain metals II.* Warrendale, USA : TMS 2002. P. 341–350.
9. Влияние содержания B₄C на структуру и коэффициент термического расширения металломатричного композиционного материала на основе сплава Al-5%Cu / А. В. Поздняков [и др.] // *ФММ.* 2016. Т. 117. № 8. С. 811–816.
10. Microstructure and material characterization of 6063/B₄C and 1545K/B₄C composites produced by two stir casting techniques for nuclear applications / A.V. Pozdniakov [et al.] // *JALCOM.* 2016. Vol. 664. P. 317–320.
11. ГОСТ 9.021–74. Единая система защиты от коррозии и старения. Алюминий и сплавы алюминиевые. Методы ускоренных испытаний на межкристаллитную коррозию. М. : Издательство стандартов, 1983. 6 с.